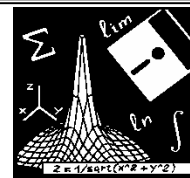


ЭЛЕКТРОНИКА



УДК 681.586.783

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

А.Р.Петрова, Р.В.Петров*

MAGNETOELECTRIC MAGNETIC FIELD SENSORS. APPLICATION PROSPECTS

A.R.Petrova, R.V.Petrov*

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), a.r.petrova@yandex.ru***Институт электронных и информационных систем НовГУ, Roman.Petrov@novsu.ru*

Рассматривается использование перспективных магнитоэлектрических материалов, применяемых в качестве чувствительного элемента для датчиков магнитного поля в технических устройствах космических аппаратов. Рассмотрена конструкция магнитоэлектрического датчика магнитного поля, представлены и проанализированы его характеристики. Датчик имеет три участка характеристики зависимости выходного напряжения от постоянного магнитного поля, которые могут быть использованы без дополнительной линеаризации в измерении величины внешних магнитных полей. Исследована АЧХ датчика при трех значениях постоянного магнитного поля, сделан вывод о том, что существенное влияние на его характеристику имеет не только механическая конструкция, но и параметры эквивалентной электрической схемы, без учёта которых получить оптимальные значения затруднительно. Рассмотрен один из вариантов создания магнитного компаса на основе магнитоэлектрических композитов. С помощью датчика проведены измерения магнитного поля Земли, и показано, что датчик имеет достаточную чувствительность к таким полям, при этом не показывает направление магнитного поля, давая результат по модулю напряжённости. Также приведены перспективы магнитоэлектрического датчика магнитного поля для применения в конструкциях аэрокосмической техники, подчёркиваются преимущества перед известными датчиками на эффекте Холла, в частности, по чувствительности и радиационной стойкости. Приводятся примеры технических применений.

Ключевые слова: *магнитоэлектрический датчик, датчик магнитного поля, авионика, авиационное оборудование*

The paper is devoted to advanced magnetoelectric materials used as the sensing element for magnetic field sensors in technical devices of spacecraft. The design of the magnetoelectric magnetic field sensor is considered and its characteristics are presented and analyzed. The sensor has three regions on the dependence of the output voltage vs the constant magnetic field, which can be used for measurement of the magnitude of external magnetic fields without preliminary linearization. The frequency response of the sensor at three values of constant magnetic field has been investigated. Both a mechanical design and parameters of the equivalent electric circuit have a significant influence on its characteristic, which is important to obtain optimal parameters. A variant of the magnetic compass design based on magnetoelectric composites was considered. The measurements of the Earth's magnetic field were carried out using the developed sensor. The sensor has sufficient sensitivity to such fields but it does not show the direction of the magnetic field, giving the result in the form of a magnetic field strength module. The prospects of the magnetoelectric magnetic field sensor for use in aerospace engineering are presented and the advantages over the Hall effect sensors on sensitivity and radiation resistance are emphasized. Some examples of technical applications are given.

Keywords: *magnetoelectric sensor, magnetic field sensor, avionics, aviation equipment*

Введение

Использование перспективных магнитоэлектрических материалов, применяемых в качестве чувствительного элемента для датчиков магнитного поля в приборостроении, представляет значительный интерес и является актуальной темой для промышленной автоматики, автомобильной и аэрокосмической техники [1]. Для разработки эффективных датчиков магнитного поля обычно используют прямой магнитоэлектрический (МЭ) эффект, который заключается в индуцировании электрической поляризации в МЭ материале во внешнем магнитном поле [2]. На основе этого эффекта могут быть разработаны датчики магнитного поля, датчики тока, дат-

чики положения, датчики вибрации, энергохарактеристики и др.

Материалы с МЭ эффектом часто относят к так называемым функциональным материалам, благодаря которым можно разрабатывать принципиально новые конструкторские решения и технологии в различных отраслях авиакосмической и ракетной техники, приборостроении, энергетике и медицине [3]. Преимуществами таких материалов перед традиционными, чувствительными к магнитным полям материалами, например на эффекте Холла, являются высокая радиационная стойкость, высокая чувствительность, отсутствие специальных концентраторов магнитного поля, что дает преимущества, такие как малые габариты и масса изделий.

Наибольший эффект применение МЭ материалов может дать в качестве датчиков магнитного поля. Такие датчики имеют чувствительность к магнитному полю порядка 1-10 пТл [4] и лишь незначительно уступают приборам SQUID, но при этом не требуют массивной и энергозатратной охлаждающей системы. МЭ датчики магнитного поля могут применяться как для измерения магнитных полей в земных производственных условиях, так и для изучения магнитных полей Солнца, планет, спутников и астероидов, магнитных потоков и плазменных образований. Другим перспективным направлением использования датчиков также может быть исследование возможности применения в качестве диагностирующей аппаратуры для космических аппаратов (КА). Так как отдельные узлы аппарата имеют определённую заранее известную величину магнитного поля, то отклонение от нормы этого поля будет говорить о неисправности этого узла или его пространственном положении. МЭ датчики магнитного поля вполне могут быть использованы в качестве детекторов других КА или ракет. Не менее перспективным направлением ожидается применение МЭ материалов для датчиков положения. Многие механические узлы КА требуют контроля их положения и перемещения и, соответственно, датчиков, которые это положение отслеживают. МЭ датчики могут применяться и для контроля за отстыкованными или отсоединяемыми частями аппаратов. В электронной части КА и ракет эффективно могут быть применены МЭ датчики тока, обладающие существенными преимуществами перед используемыми магниторезистивными схемами и схемами на датчиках Холла [5]. Применение МЭ датчиков будет способствовать увеличению надёжности КА. Перспективными технологиями создания герметичного скафандра могут являться технологии развития механических оболочек скафандра, а с учетом всех экстремальных факторов, действующих на организм человека, применение надежных радиационностойких МЭ датчиков становится целесообразным [6]. Цель статьи — изучение характеристик магнитоэлектрических датчиков магнитного поля и описание возможных перспектив их применения для аэрокосмической техники.

Характеристики датчиков магнитного поля

Датчики магнитного поля, имеющие в своем составе МЭ чувствительный элемент, могут быть в зависимости от рабочей характеристики разделены на датчики резонансного и нерезонансного типа. На рис.1 приведено фото датчика магнитного поля, имеющего в своем составе МЭ элемент (катушка слева) и систему обработки сигнала. В качестве чувствительного элемента может применяться система, содержащая катушку индуктивности, внутри которой установлен МЭ материал. Катушка своими выводами соединяется с источником переменного сигнала и при необходимости — с источником постоянного тока. Внутри катушки создаётся переменное модулирующее магнитное поле и, соответственно, если необходимо, постоянное магнитное поле.

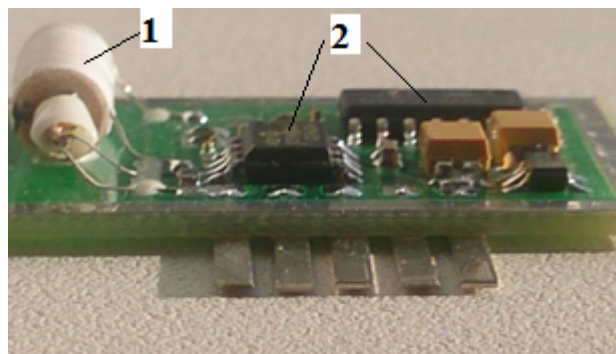


Рис.1. МЭ датчик магнитного поля. 1 — датчик магнитного поля, 2 — схема обработки сигнала

Современные МЭ материалы представлены широким перечнем возможных структур от монокристаллических, до синтетических нанопилар. В случае практического использования наиболее применимыми считаются слоистые композиционные структуры в составе пьезоэлектрика ЦТС и аморфного магнитомягкого сплава на основе железа с общим названием метглас. Для экспериментального макета МЭ датчика магнитного поля (МЭДМП) были изготовлены пластина из пьезоэлектрика ЦТС-19 с размерами 10×1×0,38 мм и шесть пластин из метгласа типа АМАГ-200С фирмы ПАО «Мстатор» с размерами 10×1×0,02 мм. Слоистая композиционная симметричная структура была изготовлена склеиванием по три пластины с каждой стороны пьезоэлектрика аналогично описанию, представленному ранее в [5]. Изготовленный материал помещен в катушку с размерами: длина — 10 мм, внутренний диаметр — 1 мм, внешний диаметр — 4 мм, проводник диаметром 0,1 мм и сопротивление обмотки — 510 Ом. При подаче синусоидального электрического напряжения частотой 1 кГц и 10 В на выводы катушки внутри нее создается переменное магнитное поле величиной около 32 Гс. МЭ материал внутри соленоидальной катушки расположен так, что создает конструкцию по типу балки с заземленным концом, выводы от электродов проведены наружу конструкции.

Измерительный стенд включал в себя следующее оборудование: генератор SFG-71003, осциллограф НМО722, магнитометр АТТ-8701, гауссметр DX-180, магнитную измерительную систему. Рис.2 демонстрирует схему измерительного стенда.

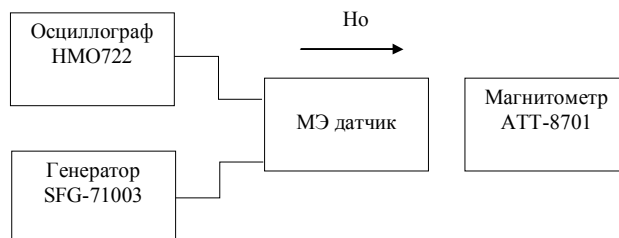


Рис.2. Схема измерительного стенда

На стенде были проведены измерения характеристик МЭДМП. Была измерена зависимость выходного напряжения датчика от постоянного магнитного

поля при частоте синусоидального напряжения, поданного на соленоидальную катушку. Частота генератора подобрана таким образом, чтобы соответствовать частоте аксиальной моды колебаний МЭ элемента. Постоянное магнитное поле было выбрано таким образом, чтобы соответствовать максимальному выходному напряжению МЭ элемента. Выходное напряжение при 50 Э примерно равнялось 2,18 В. На рис.3 показана рассмотренная характеристика. График имеет три участка с близкой к линейной характеристикой. Первый участок — от 0 до 10 Э, второй — от 10 до 30 Э, третий — от 40 до 50 Э. Для конструирования устройств возможно применение любого из них или их комбинации без дополнительных мер по линейаризации. Второй участок с наибольшей крутизной имеет предпочтения по практическому использованию, так как выходной сигнал имеет больший динамический диапазон. В то же время сравнительно легко может быть реализовано на первом участке устройство, показывающее направление магнитного поля Земли. Однако заметим, что МЭДМП показывает только модуль магнитного поля, не имея метки положительного либо отрицательного направления.

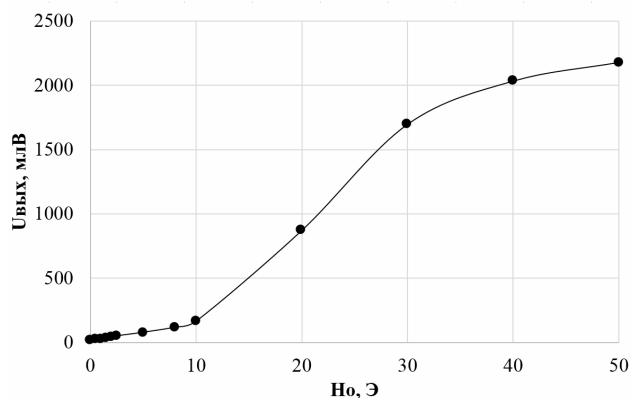


Рис.3. Зависимость выходного напряжения от внешнего постоянного магнитного поля

Для определения рабочих характеристик были проведены измерения амплитудно-частотной характе-

ристики (АЧХ) МЭДМП при разных значениях действующего постоянного магнитного поля — 1; 20 и 50 Э. АЧХ датчика приведена на рис.4. На АЧХ влияет то, что в принципе катушка является фильтром низкой частоты, и на частотах больше нескольких килогерц датчик испытывает значительное затухание сигнала. Тем не менее, на резонансной частоте около 182,5 кГц резонансный отклик может быть значительным и представлять практический интерес. Известно, что магнитное поле Земли составляет доли Эрстед и может быть измерено с помощью специальных приборов — магнитометров. Для выяснения возможности создания сравнимого по чувствительности с магнитометром АТТ-8701 прибора на основе МЭ эффекта были проведены измерения, представленные на рис.5-8.

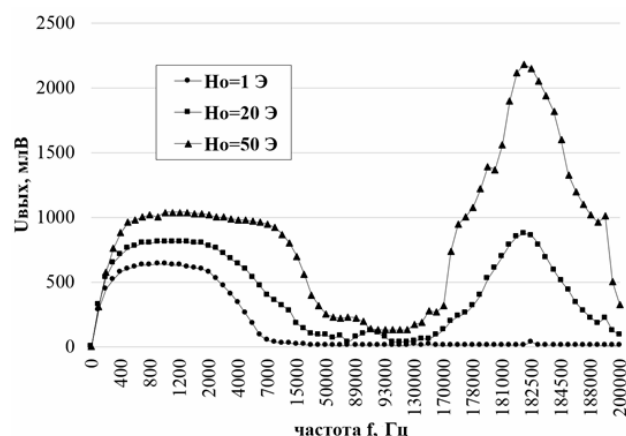


Рис.4. АЧХ МЭДМП при разных значениях подмагничивающего поля

Для калибровки магнитного поля используем магнитометр АТТ-8701. На рис.5 представлена АЧХ МЭДМП при значениях подмагничивающего поля, сравнимых с магнитным полем Земли.

Осциллограммы выходного напряжения МЭДМП показаны на рис.6. Левый график показывает значение при включении подмагничивающего магнитного поля примерно -2 Э, а правый график — значение, соответствующее примерно 0 Э.

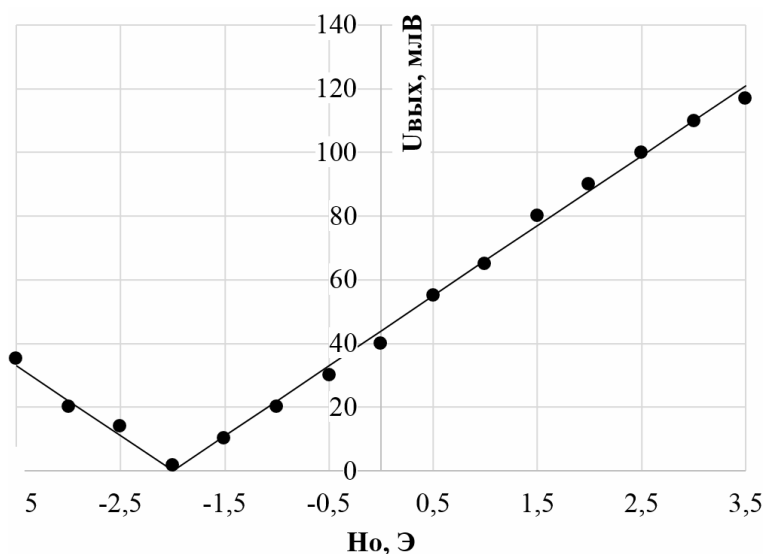


Рис.5. Выходные напряжения МЭДМП при значениях подмагничивающего поля, сравнимых с магнитным полем Земли

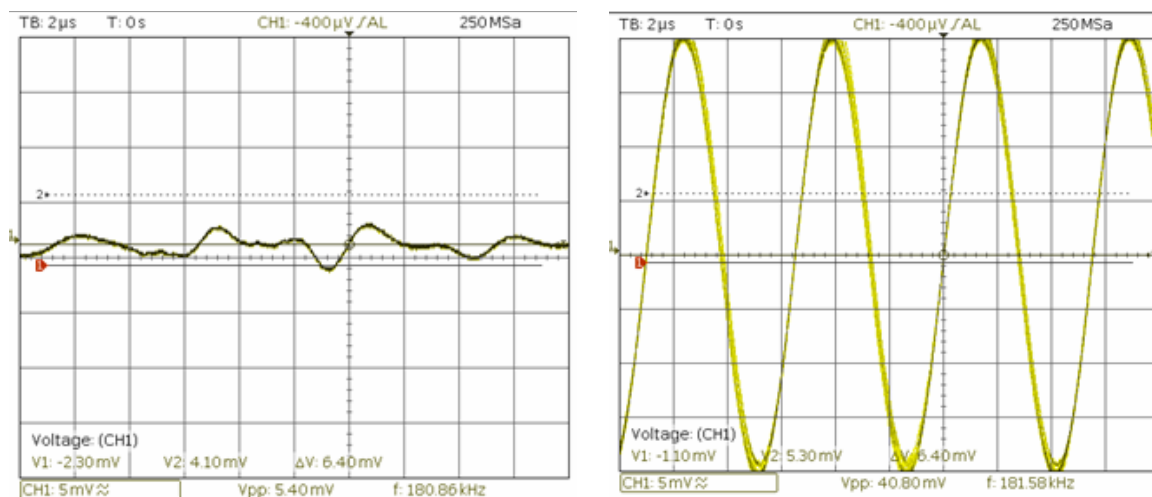


Рис.6. Осциллограммы выходных напряжений

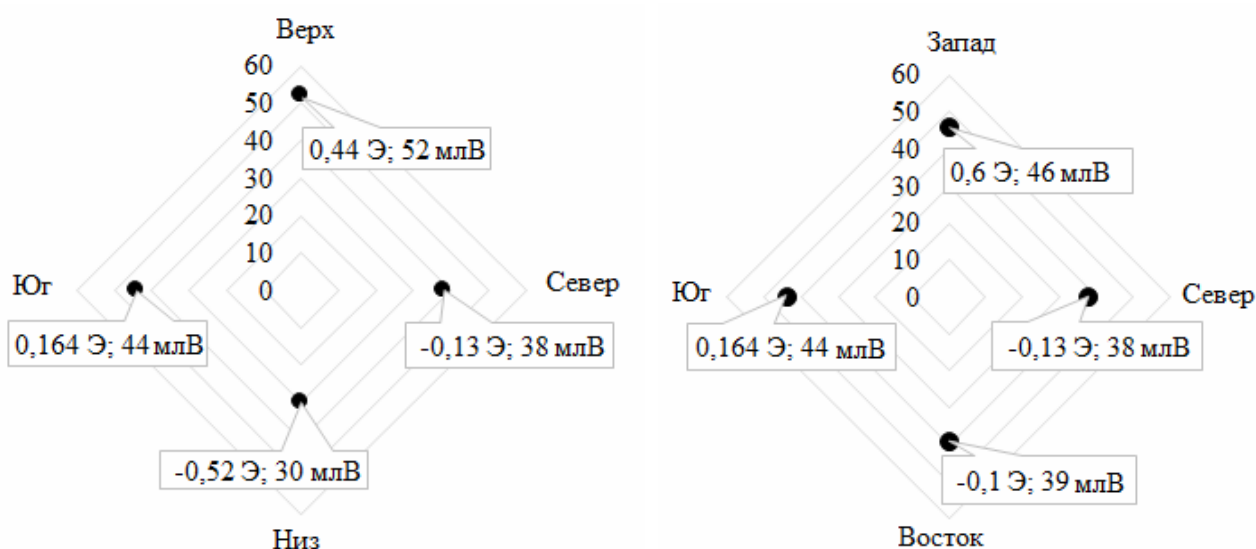


Рис.7. Данные МЭДМП в соответствии со сторонами света

На рис.7 приведены две диаграммы с экспериментальными данными выходных напряжений МЭДМП при определенных значениях магнитного поля Земли, соответствующих естественному фону лаборатории и направлению сторон света.

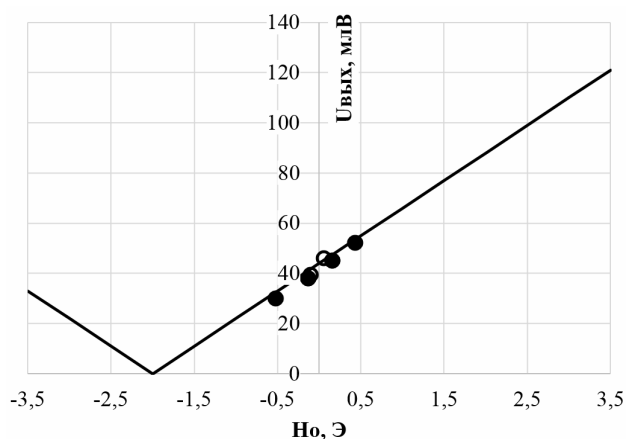


Рис.8. Выходные напряжения МЭДМП при значениях подмагничивающего поля Земли

Данные, представленные на рис.7, легко сопоставить с данными, полученными на рис.5. Сведем представленные данные из рис.7 на один график рис.8, где теоретические линии идентичны для обоих графиков 5 и 8, а круглые маркеры обозначают эксперимент, представленный на рис. 7. Все полученные данные с удовлетворительной степенью точности ложатся на предсказанную линию. Конструкция и технология МЭДМП, таким образом, дает возможность проводить точные измерения малых магнитных полей.

Полученные данные в целом позволяют утверждать возможность реализации устройства подобного электронному компасу. Также очевидно, что на характеристики МЭДМП влияют конструктивные и электромагнитные параметры. Возможность измерения более сильных полей с удовлетворительной точностью и линейностью характеристики не вызывает сомнения и подтверждена предыдущими работами [1,5].

Перспективы применения МЭ датчиков

Задачи освоения планет и спутников Солнечной системы, полёты в космосе к другим космическим телам придают импульс новым техническим разработкам. Создаются все более сложные космические аппараты (КА) для более глубокого изучения космического пространства, которые требуют высокоточные датчики [7]. На данный момент в КА используются: солнечные датчики, позволяющие определять направление путем попадания яркого света на фоточувствительный элемент; инфракрасные датчики, создающие вертикаль ориентации; звездные датчики, определяющие положение по направлению на яркий объект и солнечную ось; гироскопы (измеряют углы поворота) и акселерометры (измеряют линейные ускорения); магнитные датчики, ориентирующие по магнитному полю, и многие другие [8].

Магнитные датчики широко применяются в современной авиакосмической технике для определения положения, скорости, контроля движения, направления, тока и других параметров. Применяются такие датчики в основном для определения положения или скоростей вращения, также можно их использовать как обычные переключатели. Магнитометры измеряют составляющие магнитного поля Земли. Частота измерения магнитометров — десятки Герц. Измеряют одну, две или три компоненты Земли. Располагать такие датчики можно как снаружи КА, так и внутри. На практике применяется несколько основных видов конструкций магнитометров: квантовые и феррозондовые [9]. Феррозондовые датчики наиболее просты в конструкции, также более отработаны и доступны. Тем не менее, их габариты, масса, стоимость, а главное, система обработки сигнала имеют несколько худшие характеристики по сравнению с МЭ датчиками. Сравнения датчиков, выполненные ранее [1], позволяют предполагать большие перспективы для применения МЭ датчиков взамен имеющимся, как и в целом устройств МЭ электроники для конструкций КА.

Заключение

В работе представлены данные измерений магнитоэлектрического датчика магнитного поля и перспектив его использования для аэрокосмической техники и ракетостроения. Датчик имеет три участка характеристики зависимости выходного напряжения от постоянного магнитного поля, которые могут быть использованы без дополнительной линеаризации в измерении величины внешних магнитных полей. Исследована АЧХ датчика при трех значениях постоянного магнитного поля, сделан вывод о том, что существенное значение на его характеристику имеет не только механическая конструкция, но и параметры эквивалентной электрической схемы, без учета которых получить оптимальные значения затруднительно. Проведены измерения магнитного поля Земли, и показано, что датчик имеет достаточную чувствительность к таким полям. В статье приведены перспективы магнитоэлектрического датчика магнитного поля для применения в конструкциях аэрокосмической техники, подчеркиваются преимущества перед из-

вестными датчиками на эффекте Холла, в частности, по чувствительности и радиационной стойкости. Приводятся примеры применений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-48-530190 Тр.а.

1. Петров Р.В., Леонтьев В.С. Магнитоэлектрический магнитометр // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2014. №75. Т.1. С.29-32.
2. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Tatarenko A.S. Magnetolectric Magnetometers // High Sensitivity Magnetometers, Smart Sensors, Measurement and Instrumentation. Chapter No.5. Springer International Publishing Switzerland 2016. A. Grosz et al. (eds.). P.127-166.
3. Никитин А.О., Петрова А.Р., Петров Р.В. Магнитоэлектрическая система управления оборотами бесколлекторного электродвигателя для беспилотных летательных аппаратов // Вестник НовГУ. Сер.: Техн/ науки. 2017. №7 (105). С.26-31.
4. Junyi Zhai, Zengping Xing, Shuxiang Dong, Jiefang Li, and D. Viehland Detection of pico-Tesla magnetic fields using magneto-electric sensors at room temperature // APL. 2006. V.88. P.062510.
5. Bichurin M., Petrov R., Leontiev V. et al. Magnetolectric Current Sensors // Sensors. 2017. V.17(6). P.1271. doi:10.3390/s17061271.
6. Петрова А.Р., Петров Р.В. Анализ перспективных технологий создания герметичного скафандра // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2018. №1 (107). С.37-41.
7. Космические аппараты / Под общ. ред. К.П.Феоктистова. М.: Воениздат, 1983. 319 с.
8. Жуков А.О., Захаров А.И., Прохоров М.Е. и др. Комплексные системы ориентации космических аппаратов и контроль внутренней метрологии // Сб. тр. Второй Всерос. науч.-техн. конф. Минцевские чтения. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2015. С.206-215.
9. Алехин В. Применение микроэлектромеханических систем в военном спутникостроении // Зарубежное военное обозрение. 2004. №02 [Электронный ресурс]. URL: <http://militaryarticle.ru/zarubezhnoe-voennoe-obozrenie/2004-zvo/7194-primenenie-mikrojelektromehchanicheskikh-sistem-v>.

References

1. Petrov R.V., Leont'ev V.S. Magnitoelektricheskii magnitometr [Magnetolectric magnetometer]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2014, no. 75, vol. 1, pp. 29-32.
2. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Tatarenko A.S. Magnetolectric Magnetometers. Grosz A. et al., eds. High Sensitivity Magnetometers, Smart Sensors, Measurement and Instrumentation. Switzerland, Springer International Publishing, 2017, pp. 127-166.
3. Nikitin A.O., Petrova A.R., Petrov R.V. Magnitoelektricheskaiia sistema upravleniia oborotami beskollektornogo elektrodvigatel'ia dlia bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Magnetolectric control system of the brushless motor revs for drones]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2017, no. 7(105), pp. 26-31.
4. Zhai J., Xing Z., Dong S., Li J., Viehland D. Detection of pico-Tesla magnetic fields using magneto-electric sensors at room temperature. Applied Physics Letters, 2006, v.88, p.062510.
5. Bichurin M., Petrov R., Leontiev V., Semenov G., Sokolov O. Magnetolectric current sensors. Sensors, 2017, vol. 17(6), p. 1271. doi: 10.3390/s17061271.
6. Petrova A.R., Petrov R.V. Analiz perspektivnykh tekhnologii sozdaniia germetichnogo skafandra [Analysis of promising technologies for creating a hermetic spacesuit]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2018, no. 1(107), pp. 37-41.
7. Feoktistov K.P., ed. Kosmicheskie apparaty [The spacecraft]. Moscow, "Voensizdat" Publ., 1983. 319 p.

8. Zhukov A.O., Zakharov A.I., Prokhorov M.E. et al. Kompleksnye sistemy orientatsii kosmicheskikh apparatov i kontrol' vnutrennei metrologii [Complex systems of space vehicle orientation and the internal metrology control]. Sbornik trudov Vtoroi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh konstruktorov i inzhenerov, posviashchennoi 120-letiiu so dnia rozhdeniia akademika A.L. Mints i 60-letiiu aspirantury Radiotekhnicheskogo instituta "Mintsevskie chteniia" [Proc. 2nd All-Russia Sci. & Tech. Conf. of Young Engineers Dedicated to the 120th Birth Anniversary of Academician A.L. Mints and to the 60th Anniversary of Radio Engineering Postgraduate Education "Mints Readings"]. Moscow, 2015, pp. 206-215.
9. Alekhin V. Primenenie mikroelektromekhanicheskikh sistem v voennom sputnikostroenii [Application of microelectro-mechanical systems for military satellite construction]. Zarubezhnoe voennoe obozrenie, 2004, no. 02. Available at: <http://militaryarticle.ru/zarubezhnoe-voennoe-obozrenie/2004-zvo/7194-primenenie-mikroelektromekhanicheskikh-sistem-v>.